

ANÁLISIS DE FACTORES QUE AFECTAN AL ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN

David Revuelta Crespo, Dr. Ing. Industrial, Científico Titular, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – CSIC

Pedro Carballosa de Miguel, Dr. Ing. de Materiales, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – CSIC

José Luis García Calvo, Dr. en CC. Medioambientales, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – CSIC

RESUMEN: La Instrucción de Hormigón Estructural recoge, entre otras acciones para asegurar la durabilidad de las estructuras de hormigón, la realización de ensayos de penetración de agua bajo presión en hormigones sometidos a ciertos tipos de ambientes. En este estudio se analizan factores que afectan al resultado de dicho ensayo sobre hormigones fabricados con áridos comunes en zonas de la geografía española.

1. INTRODUCCIÓN

El ensayo de determinación de la profundidad de agua bajo presión sobre hormigón endurecido es un método normalizado por el Comité Europeo de Normalización [1] cuya primera versión como norma europea fue publicada en el año 2001. El ensayo está basado en aplicar agua a una presión de 500 kPa durante 72 horas sobre una de las caras de una probeta de hormigón endurecido. A continuación, se divide la probeta por rotura en dos mitades y se mide la profundidad de penetración del frente de agua. La norma especifica que, hasta el momento del ensayo, las probetas deben curarse completamente sumergidas en agua.

Este método fue empleado por vez primera por Soroka et al. a principio de la década de 1970 [2] con objeto de evaluar de forma indirecta la durabilidad de distintos hormigones, y durante la década de 1980 fue adoptado por distintos investigadores para clasificar la calidad del hormigón desde el punto de vista de su durabilidad [3-5], debido a su aparente facilidad de implementación e interpretación de resultados. Aunque el fundamento del método empleado por estos autores era el mismo, existían diferencias entre ellos tanto en el régimen de curado previo al ensayo (sumergido en agua, cámara húmeda) como en el número de escalones y la magnitud de la presión a la que se sometían las probetas.

Para tratar de reducir la variabilidad introducida por los factores mencionados anteriormente, el método fue normalizado por primera vez en Alemania en 1978 [6], y posteriormente recogido en una norma ISO [7]. En España, la primera norma que recoge el método data de 1990 [8]. La versión española de 1990 presenta diferencias importantes respecto a la actual versión europea: se establecía que, 24 horas antes del ensayo, las probetas debían secarse en estufa a $50\pm 5^{\circ}\text{C}$; durante el ensayo, se aplicaban tres escalones de presión (100 kPa durante 48 horas, 300 kPa y 700 kPa durante 24 horas cada uno); y, por último, además de la penetración máxima de agua, se determinaba la profundidad media.

La Instrucción de Hormigón Estructural EHE de 1998 [9] estableció como reglamentario, por primera vez en España, la determinación de la profundidad de penetración conforme a [8] como constatación experimental, de carácter indirecto, del cumplimiento de los requisitos de mínimo contenido de cemento y máxima relación agua/cemento establecidos como estrategia para asegurar la durabilidad de las estructuras de hormigón. Esta comprobación se realizaba para hormigones sometidos a clases de exposición con riesgo de corrosión por cloruros (IIIa, IIIb, IIIc y IV), ataque químico (Qa, Qb y Qc), hielo-deshielo (E y F) o abrasión (H). La idea subyacente es que una forma de garantizar la durabilidad del hormigón, así como su colaboración a la protección de las armaduras frente a la corrosión, consiste en obtener un hormigón con una permeabilidad reducida. Los límites considerados suficientes para garantizar esta impermeabilidad eran de 50 mm para la profundidad máxima, y de 30 mm para la profundidad media, para todos los ambientes mencionados.

La EHE fue sustituida el año 2008 por la vigente Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 [10]. La EHE-08 mantiene la determinación de la profundidad de penetración como comprobación de que el hormigón posee una impermeabilidad suficiente como para garantizar la durabilidad durante la vida útil de la estructura. La comprobación debe realizarse empleando el escalón único de presión de la vigente norma europea, pero la Instrucción introduce la modificación de que, previo a la realización del ensayo, las probetas deben someterse a un período de secado de 72 horas en estufa a $50\pm 5^{\circ}\text{C}$. Los límites son los mismos que en la anterior Instrucción y para los mismos tipos de ambiente, con la salvedad de elementos prefabricados sometidos a los ambientes IIIc, Qb y Qc, que se establecen en 30 mm para la profundidad máxima y 20 mm para la profundidad media (Tabla 1).

Tabla 1. Requisitos establecidos en la EHE-08 para la comprobación de la penetración de agua bajo presión (Art. 37.3.3).

Clase de exposición	Especificación para la profundidad máxima	Especificación para la profundidad media
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	50 mm	30 mm
IIIc, Qb, Qc (sólo en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

Está previsto que el futuro Código Estructural, que sustituirá próximamente a la actual Instrucción EHE-08, mantenga dentro de la estrategia establecida en el Código para asegurar la durabilidad de estructuras de hormigón el requisito de comprobación de la penetración de agua bajo presión en términos similares a los actuales.

A pesar de la relativa sencillez del método, se han planteado dudas sobre el mismo desde las primeras veces que ha sido utilizado debido a la alta variabilidad del ensayo [11], y a la influencia de distintos factores en los resultados. En este sentido, parece claro que el tratamiento previo puede tener una influencia importante en la profundidad de los frentes de penetración para un mismo tipo de hormigón, ya que además del mecanismo de transporte de agua por permeabilidad en un medio poroso debido a la diferencia de presiones, el secado previo que establece la

EHE-08 puede introducir un nuevo mecanismo de transporte como es la capilaridad, que debería conducir a una mayor penetración del agua y puede contribuir a la variabilidad. Otra de las dificultades señaladas desde que se emplea el método es la dificultad para visualizar correctamente el frente de penetración, especialmente en probetas curadas por inmersión total en agua, razón por la que se cree que se introdujo el tratamiento previo con objeto de asegurar la correcta visualización del frente una vez se divide la probeta en dos mitades.

Este trabajo pretende evaluar la influencia de dos factores, la relación agua/cemento y el tratamiento previo (curado en balsa o secado en estufa conforme al procedimiento de la EHE-08), en los resultados obtenidos sobre hormigones fabricados con áridos de naturaleza granítica, un material habitual para la fabricación de hormigones en amplias zonas de la Península. Este interés se debe a las dificultades puestas de manifiesto por fabricantes de hormigón preparado para el cumplimiento del requisito establecido en la actual Instrucción.

2. METODOLOGÍA

2.1. MATERIALES

Para la fabricación de los hormigones objeto de este estudio se empleó un cemento del tipo III/A 42,5 N/SR conforme a la norma UNE-EN 197-1, de la empresa Cementos Tudela Veguín, S.A.

Los áridos empleados son de naturaleza granítica, suministrados en las fracciones 0/4, 6/12 y 12/20 por la empresa General de Hormigones, S.A. La Tabla 2 recoge las principales características físicas de los áridos, densidad y absorción de agua, determinadas conforme a la norma UNE-EN 1097-6.

Tabla 2. Propiedades físicas de los áridos empleados. Densidad y absorción de agua conforme UNE-EN 1097-6.

Fracción	Naturaleza	Densidad (g/cm ³)	Absorción de agua (%)
Arena 0/4	Granítica	2,65	0,09
Grava 6/12	Granítica	2,56	1,16
Grava 12/20	Granítica	2,58	1,20

Con objeto de alcanzar una consistencia dentro del mismo rango para cada una de las amasadas fabricadas, se empleó el aditivo polifuncional ME 3850, proporcionado por la casa BASF.

2.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la realización de este trabajo se ha llevado a cabo un diseño experimental 2² (dos factores y dos niveles por factor), con tres repeticiones por combinación de factores (Tabla 3), lo que resulta en un total de N = 12 resultados de ensayo.

Tabla 3. Diseño experimental 2², factores y número de repeticiones.

Número de repeticiones		Tratamiento previo al ensayo		Total
		Balsa	Secado previo	
Relación agua/cemento	0,5	3	3	6
	0,7	3	3	6
Total		6	6	12

Para la relación agua/cemento (a/c) se han elegido dos niveles, $a/c = 0,5$ y $a/c = 0,7$. El nivel $a/c = 0,5$ correspondería a un hormigón que cumple con el requerimiento de contenido de agua máxima permitida para una clase de exposición del tipo IIIa (la más desfavorable desde el punto de vista de relación a/c, al ser la más alta de la permitida entre todos los ambientes estipulados en la Instrucción que requieren de la comprobación de la profundidad de penetración) y que por tanto es de suponer arrojará resultados dentro de los límites de la Tabla 1 para ambos casos, puesto que la hipótesis es que el secado es más desfavorable y por tanto arroja mayores valores de profundidad de penetración; el segundo nivel elegido, $a/c = 0,7$, correspondería a un hormigón que no cumple con los requisitos, y por tanto en teoría debería arrojar resultados fuera de los límites establecidos por la Instrucción, al menos para el tratamiento que establece de secado previo durante 72 horas.

Se fabricaron por tanto dos tipos de hormigón, con el mismo tipo de árido granítico, mismo contenido de cemento III/A 42,5 N/SR de 300 kg/m³, y dos relaciones a/c distintas. La elección del contenido de cemento se hizo para ser coherentes con el requisito de contenido mínimo exigido en la EHE al ambiente IIIa, que como se ha mencionado previamente es a priori el más limitante desde el punto de vista de la durabilidad. Para mantener los contenidos de cemento en cada una de las fórmulas, con objeto de aislar este factor, se ajustó el volumen de los áridos para que mantuvieran las mismas proporciones entre sí en volumen. Las dos dosificaciones nominales empleadas se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4. Dosificaciones empleadas

Material	Relación a/c = 0,5	Relación a/c = 0,7
	kg/m ³	
CEM III/A 42,5 N/SRC	300	300
Arena 0/4 Granítica (49%)	930	854
Árido 6/12 Granítico (15%)	280	257
Árido 6/12 Granítico (36%)	680	624
Agua	150	210

La consistencia objetivo para ambas mezclas era de 8 ± 2 cm, de modo que la variación en el resultado de penetración de agua no se viera afectada por el grado de compactación. Para conseguirla, las dosificaciones se ajustaron a base de aditivo polifuncional en el momento de la fabricación.

En cuanto al tratamiento previo al ensayo, se han comparado dos niveles: por un lado, el estrictamente recogido en la norma UNE-EN 12390-8 de conservación de las probetas en agua a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta el momento del ensayo; y por otro, el secado previo al ensayo durante tres días en estufa a $50 \pm 5^\circ\text{C}$.

Para cumplir con el número de ensayos previstos en el diseño experimental, se realizaron un total de 6 amasadas con los componentes descritos previamente, 3 por cada una de las mezclas de la Tabla 3. Para cada amasada se fabricaron 6 probetas cilíndricas de dimensiones Ø15x30 cm y 2 probetas cilíndricas de dimensiones Ø10x20 cm, conforme a la norma UNE-EN 12390-2. Todas las probetas se conservaron durante al menos 28 días sumergidas en balsa de agua a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Transcurrido el periodo de curado, tres probetas por cada amasada se sometieron directamente al ensayo de penetración de agua bajo presión conforme a la norma UNE-EN 12390-8. ; otras tres probetas Ø15x30 cm se sometieron al secado estipulado en la EHE-08 (72 horas en estufa a $50\pm 5^{\circ}\text{C}$). Las dos probetas Ø10x20 cm se ensayaron a compresión de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-3, a los 28 días de edad.

Para cada ensayo, por tanto, se determinaron la penetración máxima y media de agua bajo presión como la media de tres probetas

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos en la campaña descrita en los apartados anteriores, de penetración máxima y media de agua bajo presión sobre hormigones con árido granítico. La Tabla 6 muestra la media y la desviación estándar para cada una de las combinaciones de factores.

Las Figuras 1 y 2 muestran los diagramas de caja y bigotes de los resultados obtenidos para la penetración máxima y media, respectivamente. En el gráfico se marcan los valores atípicos de acuerdo al criterio de Tukey [12]: el círculo marca valores atípicos leves (1,5 veces por encima del rango intercuartil), y con un asterisco se marcan los valores atípicos extremos (por encima de 3 veces el rango intercuartil).

Tabla 5. Resultados de la campaña experimental.

Relación a/c	Preparación	Profundidad máxima (mm)					
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Media	Máximo	Desviación
0,5	Balsa	1	1	1	1	1	0,0
		1	1	1	1	1	0,0
		10	25	10	15	25	8,7
	Estufa	25	65	30	40	65	21,8
		15	35	30	27	35	10,4
		25	40	25	30	40	8,7
0,7	Balsa	30	25	25	27	30	2,9
		15	45	20	27	45	16,1
		25	25	30	27	30	2,9
	Estufa	30	30	33	31	33	1,7
		30	35	75	47	75	24,7
		30	40	52	41	52	11,0

Relación a/c	Preparación	Profundidad media (mm)					
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Media	Máximo	Desviación
0,5	Balsa	1	1	1	1	1	0,0
		1	1	1	1	1	0,0
		2	6	2	3	6	2,3
	Estufa	6	14	13	11	14	4,4
		2	5	5	4	5	1,7
		10	18	11	13	18	4,4
0,7	Balsa	24	21	17	21	24	3,5
		6	8	19	11	19	7,0
		12	11	12	12	12	0,6
	Estufa	22	26	23	24	26	2,1
		5	24	7	12	24	10,4
		22	18	35	25	35	8,9

Tabla 6. Media y desviación de los resultados para cada combinación de factores.

Relación a/c	Preparación	Medias		Desviación estándar	
		Prof. Máxima (mm)	Prof. Media (mm)	Prof. Máxima (mm)	Prof. Media (mm)
0,5	Balsa	7	2	8,2	1,6
	Estufa	34	9	14,2	5,2
0,7	Balsa	27	14	8,3	6,1
	Estufa	39	20	15,2	9,3

Figura 1. Diagrama de caja de los resultados de profundidad máxima de penetración de agua (IBM® SPSS® Statistics v.24).

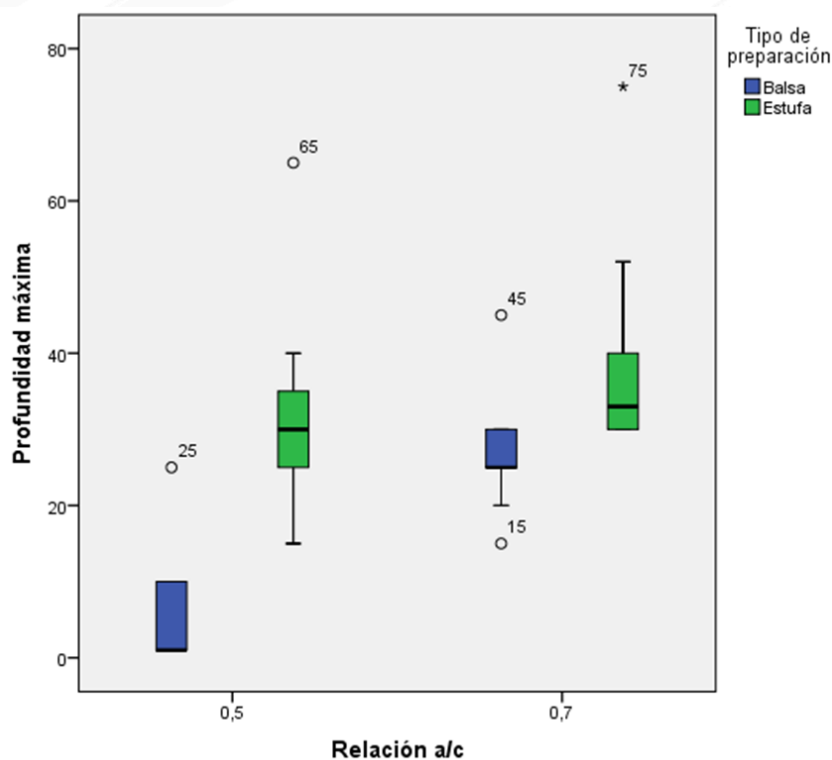
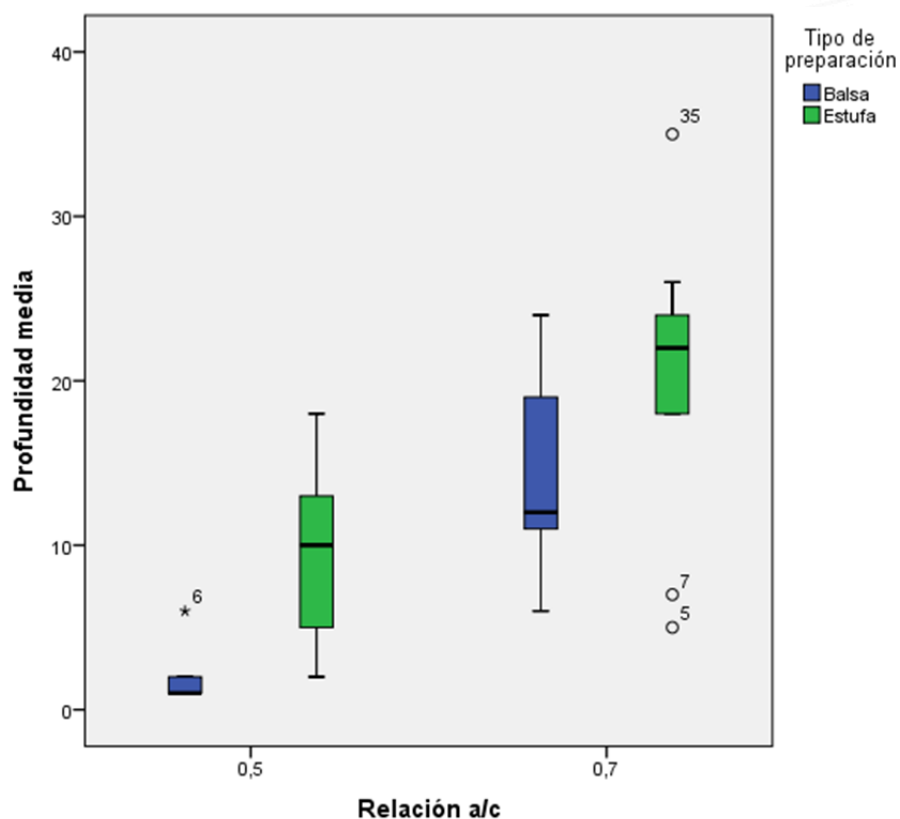


Figura 2. Diagrama de caja de los resultados de profundidad media de penetración de agua (IBM® SPSS® Statistics v.24).



Lo primero que llama la atención es que, en ninguno de los casos, la media de las tres probetas ensayadas para cada una de las combinaciones de factores incumple los límites establecidos en la Tabla 1 para hormigones de elementos en masa o armados. Este hecho, que sería de esperar en hormigones con relación a/c = 0,5, es sin embargo contradictorio con lo esperable para hormigones con relación a/c = 0,7, ya que la comprobación de la profundidad de penetración busca precisamente la detección de hormigones que incumplan con los límites de composición establecidos en la EHE-08. Otro aspecto a destacar es el bajísimo valor de penetración obtenido para hormigones con relación a/c = 0,5 que no fueron sometidos al tratamiento de secado previo.

Tal como apuntaba la literatura [11], se observa una gran dispersión de los resultados. Esta elevada dispersión está muy influenciada por la presencia de resultados atípicos puntuales, como puede comprobarse en las Figuras 1 y 2, que distorsionan en gran medida las distribuciones. En general, el tratamiento previo de secado en estufa incrementa considerablemente la dispersión hasta casi el doble del valor de desviación estándar observado para todos los casos en los que las probetas se conservaban únicamente en balsa hasta el momento del ensayo, si bien es cierto que el tratamiento por secado arroja siempre valores por encima de cuando las probetas se han curado únicamente en balsa.

Tabla 7. Tabla ANOVA para los resultados obtenidos de profundidad de penetración máxima de agua bajo presión (obtenidos mediante IBM® SPSS® Statistics v.24).

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Profundidad máxima

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado	Parámetro de no centralidad	Potencia observada ^b
Modelo corregido	5700,222 ^a	3	1900,074	13,399	,000	,557	40,197	1,000
Intersección	24336,000	1	24336,000	171,615	,000	,843	171,615	1,000
Relación a/c	1792,111	1	1792,111	12,638	,001	,283	12,638	,931
Preparación	3481,000	1	3481,000	24,548	,000	,434	24,548	,998
Relación a/c * Preparación	427,111	1	427,111	3,012	,092	,086	3,012	,391
Error	4537,778	32	141,806					
Total	34574,000	36						
Total corregido	10238,000	35						

a. R al cuadrado = ,557 (R al cuadrado ajustada = ,515)

b. Se ha calculado utilizando $\alpha = ,05$

Tabla 8. Tabla ANOVA para los resultados obtenidos de profundidad de penetración media de agua bajo presión (obtenidos mediante IBM® SPSS® Statistics v.24).

Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Profundidad media

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta parcial al cuadrado	Parámetro de no centralidad	Potencia observada ^b
Modelo corregido	1655,556 ^a	3	551,852	14,388	,000	,574	43,165	1,000
Intersección	4715,111	1	4715,111	122,936	,000	,793	122,936	1,000
Relación a/c	1248,444	1	1248,444	32,550	,000	,504	32,550	1,000
Preparación	400,000	1	400,000	10,429	,003	,246	10,429	,879
Relación a/c * Preparación	7,111	1	7,111	,185	,670	,006	,185	,070
Error	1227,333	32	38,354					
Total	7598,000	36						
Total corregido	2882,889	35						

a. R al cuadrado = ,574 (R al cuadrado ajustada = ,534)

b. Se ha calculado utilizando $\alpha = ,05$

Las Tablas 7 y 8 muestran el análisis de varianza factorial (ANOVA) realizado sobre los resultados obtenidos. Se deduce que tanto el factor relación agua/cemento como la preparación previa son estadísticamente significativos puesto que ambos factores presentan valores significativos inferiores a 0,05 (columna "Sig.") para ambas medidas, profundidad máxima y penetración mínima. Esto implica que la influencia por separado de ambos factores es apreciable desde

el punto de vista estadístico, lo que significa que cambios en la relación agua/cemento influyen en los resultados, independientemente del tratamiento. Se observa un aumento en los valores de penetración tanto máxima como mínima, lo que confirma la hipótesis por la que se establece este ensayo como instrumento de control de variaciones de la composición del hormigón en cuanto a su contenido en agua establecido en la Instrucción EHE-088; y viceversa: independientemente de la relación agua/cemento, el secado previo produce variación en los resultados: en este caso, la introducción del secado también aumenta el valor de penetración de agua. La potencia observada para un nivel de confianza del 95% para ambos factores considerados independientemente es superior a 0,80.

En cuanto a la interacción entre ambos factores, el ANOVA indica que no existiría un efecto combinado de ambos factores significativo desde el punto de vista estadístico, puesto que los valores de F en ambos casos son pequeños y los valores significativos están por encima de 0,05. Sin embargo, este resultado hay que tomarlo con precaución, puesto que la potencia observada para el término de interacción es baja.

Las Figuras 3 y 4 muestran el diagrama de líneas para los resultados de las medias de profundidad de penetración máxima y media de agua bajo presión (Tabla 6), donde puede comprenderse mejor la posible interacción. Las líneas de error de los gráficos representan dos veces el error estándar en cada combinación de factores. En ausencia de interacción, ambas líneas deberían ser paralelas, lo que sí que parece observarse para la profundidad media de penetración (Figura 4). Este no parece ser el caso para la profundidad máxima (Figura 3), aunque el test ANOVA no resulte significativo, aunque muy cerca del límite ($p\text{-value} = 0,092$). Parece observarse una tendencia en combinación de los factores: a mayor relación a/c, los resultados obtenidos de penetración máxima de penetración no se ven tan influenciados por el tratamiento. La razón por la que no es estadísticamente significativo hay que buscarla de nuevo en la elevada dispersión de las medidas, como puede comprobarse también gráficamente al representar las barras de error. La amplia dispersión hace que la campaña realizada no tenga la suficiente potencia estadística como para discriminar las variaciones existentes en la combinación de factores.

4. CONCLUSIONES

El ensayo de penetración de agua bajo presión realizado sobre hormigones fabricados con áridos graníticos mostró ser sensible a cambios tanto en la relación agua/cemento como al tratamiento por secado previo establecido en la EHE-08. Los resultados mostraron una gran dispersión, especialmente en los casos en que las probetas fueron secadas previamente conforme al procedimiento estipulado en la EHE-08. Sorprendentemente, el ensayo no dio como resultado valores de penetración fuera de los límites establecidos en la EHE-08, aun sometiendo a ensayo hormigones con relación a/c superior a los límites máximos de contenido en agua establecidos en la Instrucción, incluso cuando fueron sometidos a secado previo.

Los autores pretenden, en posteriores campañas, evaluar la influencia de distintos tipos de árido en los resultados de penetración, al igual que se ha llevado a cabo en este trabajo.

Figura 3. Gráfico de líneas para las medias obtenidas de la profundidad máxima de penetración de agua.

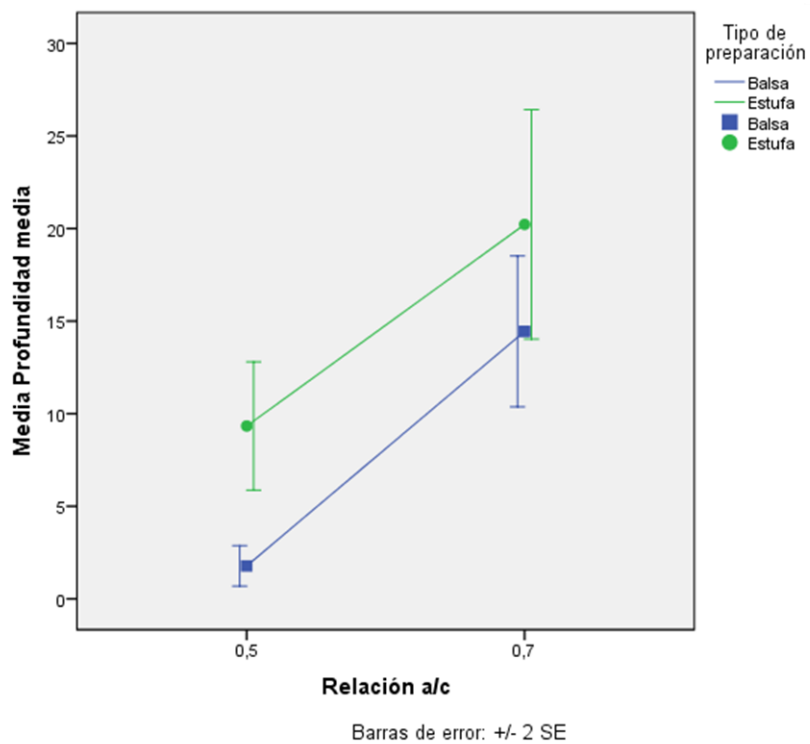
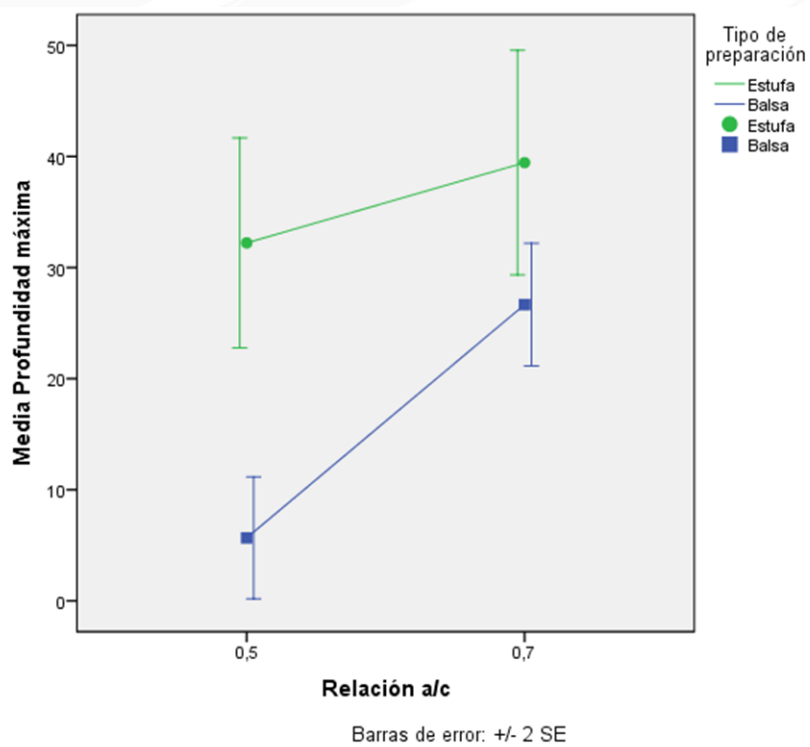


Figura 4. Gráfico de líneas para las medias obtenidas de la profundidad media de penetración de agua.



4. REFERENCIAS

- [1] AENOR-CEN (2009). *UNE-EN 12390-8:2009 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión*. Normalización Española (UNE).
- [2] Soroka, I., et al. (Sept., 1974), Permeability of Lightweight-Aggregate Concrete, En *Proceedings, Second International CIB/RILEM Symposium on Moisture Problems in Buildings*, (11, pp. 10–12), Bouwcentrum, Rotterdam, Netherlands
- [3] Diem, P. (1986), Determination of Capillary Absorptiveness of Very Dense Concrete, *Betonwerk und Fertigteil-Technik*, 52(11): 719–724
- [4] McCurich, L. H. (1986), Reduction in Permeability and Chloride Diffusion with Superplasticiser, *Concrete, Journal of the Concrete Society*, 9–10.
- [5] Baluch, M. H., et al., (1989) *Concrete Deterioration Due to Thermal Incompatibility of its Components*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1(3):105–119
- [6] Deutsches Institut Fur Normung (1978), *DIN 1048 Test Methods for Concrete*, Deutsches Institut Fur Normung. (DIN)
- [7] International Standards Organization (1983), *ISO/DIS 7031, Concrete Hardened—Determination of the Depth of Penetration of Water Under Pressure*, International Standards Organization (ISO)
- [8] AENOR (1990). *UNE 83309:1990 EX Ensayos de hormigón. Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión*. Normalización Española (UNE).
- [9] Real Decreto 2661/1998, de 11 de diciembre, por el que se aprueba la «Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)», Boletín Oficial del Estado, núm. 11, de 13 de enero de 1999, pp. 1525 a 1526.
- [10] Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08), Boletín Oficial del Estado, núm. 203, de 22 de agosto de 2008, pp. 35176 a 35178.
- [11] The Concrete Society (1988), *Permeability Testing of Site Concrete—A Review of Methods and Experience*, Concrete Society Technical Report No. 31, p. 95.
- [12] Tukey, John W (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley